第41卷 第6期
2024年12月

应用力学学报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 41 No. 6
Dec. 2024

文章编号:1000-4939(2024)06-1245-12

基于围岩监测的隧道施工期突涌水风险预测

许增光,张泽源,曹成

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室,710048 西安)

摘 要:突涌水灾害的频发对隧道安全施工和生命财产构成严重威胁,因此精准预测并有效控制隧道施工中的突涌水风险尤为重要。本研究旨在提出一种适用于隧道施工期的突涌水风险预测方法,通过反馈施工现场监测数据确定风险概率并预测水量范围。首先,在分析施工期突涌水事故案例的基础上,综合考虑地质构造和水文地质条件,并引入开挖支护、动态监测围岩以及渗压信息,建立了包含10个指标在内的突涌水评估指标体系;其次,采用博弈论组合赋权法优化主客观权重向量,构建改进功效系数模型以计算各风险等级下的综合功效系数,并在归一化处理后确定风险发生概率;最后,根据最大隶属度原则确定风险等级并预测水量范围。以鸡公岭隧道和跃龙门隧道为例,应用该方法对施工中的突涌水风险进行了预测。结果表明:所提出的基于博弈论组合权重和改进功效系数的隧道施工期突涌水灾害风险预测方法与现场开挖结果吻合较好;该方法综合考虑评估指标和风险等级之间非线性关系使预测结果更接近实际施工情况,在评估风险等级的同时实现了风险概率和涌水量范围的预测。

关键词:风险评估;突涌水;施工期;围岩监测;改进功效系数

中图分类号:U456.32 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.003

Assessment of water inrush risk during tunnel construction based on surrounding rock monitoring

XU Zengguang, ZHANG Zeyuan, CAO Cheng

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China,
Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China)

Abstract: The frequent occurrence of water inrush disasters poses a significant threat to tunnel construction safety, as well as human lives and properties. Therefore, it is crucial to accurately predict and effectively control the water inrush risk during tunnel construction. This study aims to propose a tunnel construction period-specific method for predicting water inrush risk, determining the probability of risk, and indicating the range of water quantity by incorporating construction site monitoring data. First, comprehensive consideration is given to the geological structure, and hydrogeological conditions based on analyzing water burst accident cases during construction. Information regarding excavation and support, dynamic monitoring of

收稿日期:2023-12-03 **修回日期:**2024-04-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52179143; 52209167);陕西省科技创新团队资助项目(No. 2022TD-01)
通信作者:许增光,教授。E-mail:xuzengguang@xaut.edu.cn
引用格式:许增光,张泽源,曹成. 基于围岩监测的隧道施工期突涌水风险预测[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1245-1256.
XU Zengguang, ZHANG Zeyuan, CAO Cheng. Assessment of water inrush risk during tunnel construction based on surrounding rock monitoring [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(6): 1245-1256.

surrounding rock, and osmotic pressure is incorporated to establish an evaluation index system for water inrush consisting of 10 indicators. Then, the game theory method is employed to optimize the combination weighting. Additionally, an improved efficiency coefficient model is constructed for calculating the comprehensive efficiency coefficient at each risk level, followed by determining the normalized probability of risk occurrence. Finally, based on the principle of maximum membership degree, the risk level and the water inrush scope are determined. Taking Jigongling Tunnel and Yuelongmen Tunnel as cases, this approach forecasts the risk during construction. The results show that the proposed method, which integrates the game theory, combined weight, and an improved efficiency coefficient, aligns well with the actual excavation outcomes at the site. It comprehensively considers the non-linear relationship between evaluation indices and risk grades, resulting in a prediction outcome that closely reflects the actual construction conditions. Furthermore, it enables the estimation of both risk probability and water inrush range while evaluating risk grades, thereby offering a novel approach for accurately assessing water inrush risks during tunnel construction.

Key words: risk assessment; water inrush; tunnel construction period; surrounding rock monitoring; improved efficiency coefficient

随着我国地下工程建设规模与数量的持续增长,越来越多的隧道建设正逐渐向中西部岩溶山区转移。这些地区普遍存在断层裂隙、岩溶地形等不良地质条件,在施工过程中极易破坏并引发突涌水灾害[1]。由于其突发性和高破坏性,对施工造成了严重阻碍,并可能引发其他地质灾害,进而造成巨大经济损失和人员伤亡[2]。因此,在隧道施工过程中及时预测突涌水风险、减少事故发生率已成为亟待解决的问题。

目前,国内外研究人员已经提出了多种方法来进行隧道突涌水的预测和风险评估。WANG 等[3]综合考虑影响因素间强非线性关系,基于层次分析法提出了一种基于精细风险评估和分级超前预测的预警方法。根据 100 多条隧道突涌水实测数据,LI 等[4]运用模糊数学理论定量描述突涌水因素,并构建了可视化的突涌水评估软件系统。HUANG 等[5]重点研究了岩溶发育条件和施工管理水平对隧道突涌水风险的影响,在此基础上提出了一种多指标突涌水评价方法。LIN 等[6]将解释结构模型(interpretative structural model)和贝叶斯网络(Bayesian network)相融合,实现了全断面掘进(tunnel boring machine, TBM)开挖过程中突涌水的动态控制。LI 等[7]和 ZHANG 等[8]提出了一种可更新的两阶段岩溶预测方法,显著提高了隧洞开挖中突涌水预测的准确性。此外,基于大量地下洞室突涌水案例分析,许增光等[9]构建了长深隧洞突涌水灾害评价指标体系,在初期设计阶段对突涌水量范围进行预测。李利平等[10]通过对典型影响因素进行分析,提出了突涌水风险模糊层次评价模型,并构建了隧道施工许可机制。

由于各致灾因素的多样性结构特征以及这些因素之间复杂非线性关系的存在,进一步增加了致灾因素识别和准确预测灾害风险发生的难度[11]。虽然已有大量的数学模型用于解决这一问题,但大部分研究基于岩溶发育规律,从单一的地质角度去研究突涌水,并未充分考虑现场施工和监测数据对突涌水的影响,忽略了高水压和岩石破坏之间的共同作用。实际上,突涌水是高水压和岩石破坏共同作用的结果,忽视这两个监测信息的变化会明显增加风险。高水压会促使围岩石裂纹膨胀发展,并增加岩石渗透率,进而导致地下水迅速渗入其中。随着岩体不断遭受破坏,裂隙逐渐扩大,最终引发突涌水灾害。此外,现有的分析方法主要集中在施工前期进行静态评估,在施工过程中对突涌水风险评估和发生概率预测相对较少,导致预测方法普适性不强。因此,针对隧道施工期突涌水灾害的风险预测问题,本研究拟通过分析施工期突涌水灾害案例,综合考虑地质构造、水文地质和施工监测等多元信息,建立突涌水评估指标体系。在此基础上,提出一种基于博弈论组合权重和改进功效系数的突涌水灾害风险预测方法,并借助现场监测数据进行反馈,以确定风险概率并预测水量范围,为准确预测隧道施工中的

突涌水风险提供新的研究思路。

1　施工期突涌水评估及权值分析

1.1　风险评估指标体系

隧道突涌水是多因素综合作用的结果,涉及到复杂地质、开挖扰动和岩体破坏等不确定的风险因素[12-14]。地质构造和水文地质对于突涌水灾害起着决定性作用,为其提供了灾害源和运移通道,是突涌水灾害发生的物质基础。此外,施工监测因素也是突涌水的诱因,施工扰动下高水压和岩石破坏相互作用极易引发突涌水灾害。

根据施工期突涌水灾害案例及相关文献[1,15-16],本研究深入分析了与突涌水密切相关的重要影响因素,并认为应从地质构造、水文地质和施工监测三方面综合考虑。因此,选取地质构造因素 B_1、水文地质条件 B_2和施工监测因素 B_3作为一级指标进行研究,所构建的层次指标体系如图 1 所示。

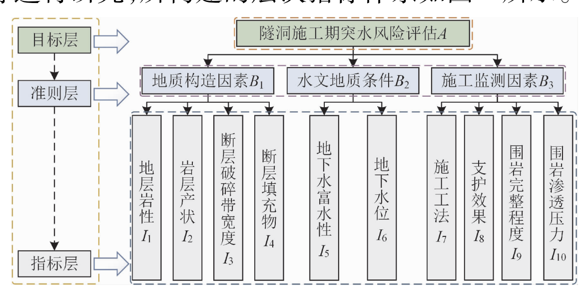


图 1　隧道施工期突涌水层次指标体系

Fig. 1　Index system for assessing water inrush during tunnel construction period

1.1.1　地质构造因素

地层岩性是影响岩溶发育强度的最主要因素。当岩层中碳酸盐岩含量较高时,可溶性岩石纯度增加;且随着岩层厚度的增加,岩溶发育程度变得越来越强,从而导致灾害风险上升。根据相关文献[7],结合岩石的可溶性和所占比例,采用岩石溶解度 t 来评估不同岩溶发育程度,并将其划分为微/不发育、弱发育、中等发育和强发育,共 4 个等级[17]。

岩层产状对地下水的流动和发育产生影响,导致岩溶发育在不同方向上呈现出差异。在水平岩层和垂直岩层中,地下水流动受限,入渗能力较弱,因此岩溶发育受到抑制。结合许振浩等[18]的研究结果,本研究将修正后的倾角划分为 4 个等级(表 1)。

隧道施工过程中出现的不良地质构造在一定程度上决定突涌水的灾害性,而富水夹泥断层带是突涌水灾害的主要导水通道[19]。断层内部存在破碎滑动面,其宽度决定渗水通道规模。根据致灾程度将断层破碎带宽度划分为 0 ~ 2 m、2 ~ 5 m、5 ~ 8 m 和 > 8 m,共 4 个等级。

富水夹泥破碎带的导水特性由内部充填构造所决定,该构造发育处充填了破碎岩体、砂砾和断层泥等混合颗粒,当内部细颗粒含量较少时,渗透性明显增强,导致渗流特性差异较大[20]。本研究将填充物根据细颗粒含量依次分为致密、稍密、松散和破碎介质 4 类。其中,破碎介质缺少细颗粒且渗流能力最强,而致密介质粒径单一胶结较好,表现出较弱渗流能力。

1.1.2　水文地质条件

突涌水灾害与地下水储存条件密切相关,施工扰动会引起地下水流动迁移,进而改变围岩的含水性和渗透特性。地下水富集程度越高,在开挖后产生的渗流量和涌出量也就越大。本研究采用地下径流模数 M(流量与汇水面积的比值)来反映地下水富水程度,并将其分为贫、弱、中、强,共 4 个等级。

地下水位的上升将增加围岩承受外部水压力的风险。通过对岩体软化作用的影响,围岩松散带范围将扩大,从而促使岩溶水更容易渗入节理面。随着地下水位的升高,突涌水危险性也逐渐增大。根据文献[21]中的突涌水实例统计数据,本研究根据地下水位对灾害的影响程度,定量划分为 0 ~ 30 m、30 ~ 70 m、70 ~ 140 m 和 > 140 m,共 4 个等级。

1.1.3　施工监测因素

在隧道未施工阶段,应力状态保持平衡稳定,突涌水风险较低。然而,在开挖揭露过程中,围岩变形松弛增大[22],周边围岩产生微小破坏裂隙。此外,地下水原有渗流路径也会因此发生改变[23]。这些微小裂隙在变形和水压的双重作用下逐渐扩展,导致掌子面及顶板滴水现象加剧,从而增加了突涌水风险。基于不同施工方法对围岩变形和应力变化的研究[24],将不同施工措施对围岩扰动破坏程度定性划分为微、弱、中、强,共 4 个等级。

及时采取合理有效的支护可以减少地下水对周围岩体的侵蚀作用,从而有效防止突涌水灾害进一步扩大。在地质条件较差的区域,若未进行合适的支护加固处理,则有可能导致严重破坏,并增加突涌水风险。根据初期支护和二次衬砌后壁面的渗水情况,对支护效果进行评估并进行分级。

围岩完整程度是决定隧道稳定性的主要因

素[2]，其强度和破碎状态直接影响抵抗变形和开挖扰动的能力。断裂带岩石往往具有较低强度和较差完整性，内部结构更为破碎且稳定性显著降低，进而更有利于地下水流动补给和溶蚀作用发生。根据WANG 等[25]对围岩完整程度与突水风险之间关系的研究，将岩石完整性系数 K_v 量化为 4 个级别。

当隧道开挖至破碎岩层带区域时，由于掘进过程中的开挖卸荷效应，大量地下水汇集并迅速形成较高水压[26]。随着后续地下施工的进行，岩体内部孔隙水压力逐渐增加，在地下水侵蚀作用下裂隙得以进一步扩展，从而使得储存在岩石中的破碎混合物在高压作用下涌出，并最终形成突水通道[2]。根据相关文献[27]，本研究将围岩渗透压力实测值划分为 0～0.1 MPa、0.1～0.4 MPa、0.4～1.0 MPa 和 >1.0 MPa，共 4 个等级。

1.2 评估指标分级标准

基于上述分析，本研究对突涌水灾害风险评估指标进行了量化分级，并建立了隧道施工期突涌水风险评估指标的分级标准(表 1)。

其中Ⅰ级表示最轻微的致灾程度，而Ⅳ级则代表着最严重的致灾程度。在这些指标中，I_9 为极小型指标，其数值越大意味着造成突涌水灾害风险的可能性越低；而其余指标均属于极大型指标。

表 1 突涌水评估指标灾害等级划分标准

Tab. 1 Criteria for evaluating water inrush disaster classification

评估指标		划分依据	Ⅰ级(微致灾性)	Ⅱ级(弱致灾性)	Ⅲ级(中等致灾性)	Ⅳ级(强致灾性)
地质构造因素	地层岩性 I_1	岩石溶解性测度值 t	0～0.042	0.042～0.104	0.104～0.254	>0.254
	岩层产状 I_2	修正后岩层倾角 $\varphi'/(°)$	0～5	5～10	10～25	25～45
	断层破碎带宽度 I_3	断层宽度 B/m	0～2	2～5	5～8	>8
	断层填充物 I_4	充填介质类型	致密介质：主要由黏土和细砂组成，粒径单一	稍密介质：砂粒、细砾和黏土等，介质均匀	松散介质：由碎裂岩、砂砾和砾质土混合而成	破碎介质：碎裂岩、砾石和粗砂组成，缺少细颗粒
	量化值	–	0～60	60～70	70～85	85～100
水文地质条件	地下水富水程度 I_5	地下径流模数 $M/(m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-2})$	0～100	100～1 000	1 000～5 000	>5 000
	地下水位 I_6	地下水位与隧洞底板高差 h/m	0～30	30～70	70～140	>140
施工监测因素	施工工法 I_7	施工扰动程度	TBM/盾构法	钻爆法分部开挖	钻爆法台阶开挖	钻爆法全断面开挖
	量化值	–	0～60	60～70	70～85	85～100
	支护效果 I_8	支护壁面渗水情况	二衬完成，壁面干燥或渗滴水	初支完成，壁面呈线状流水	初支完成，壁面呈股状流水	无支护，岩石呈裸露状态
	量化值	–	0～60	60～70	70～85	85～100
	围岩完整程度 I_9	岩体完整性系数 K_v	>0.55	0.55～0.35	0.35～0.15	0.15～0
	围岩渗透压力 I_{10}	渗透压力测量值/MPa	0～0.1	0.1～0.4	0.4～1.0	>1.0

注：定性指标 I_4、I_7 和 I_8 采用打分法划分。

1.3 博弈论组合赋权确定指标权重

1.3.1 基于频数统计的客观赋权法

本研究通过收集整理 65 例隧道施工期突涌水灾害案例，针对突涌水主要诱发因素进行了统计分析。采用频数统计法计算每个因素出现的次数及其所占比重(表 2)，并结合李术才等[7,16]的案例数据推导出相应比例关系。在对各指标权重进行归一化处理后，得到了指标的权向量 $\boldsymbol{W}_1=[0.086, 0.036, 0.137, 0.206, 0.091, 0.091, 0.105, 0.029, 0.162, 0.057]$。

表 2 施工期突涌水诱发因素统计

Tab. 2 Statistics on the factors contributing to water inrush during the construction period

突涌水成因	频次	百分比/%
岩溶强发育	9	8.57
断层带富水发育	36	34.29
地下水	19	18.10
施工扰动	11	10.48
施工管理不当	4	3.81
支护不及时/变形开裂	3	2.86
围岩破碎失稳	17	16.19
高水压	6	5.71

1.3.2　基于层次分析法的主观权重确定

根据层次分析法的基本原理[28],构建了包括目标层 $\boldsymbol{A}$、准则层 $\boldsymbol{B}$ 和指标层 $\boldsymbol{I}$,共 3 个层次的结构模型。同时,基于评价指标体系和 1-9 标度法构造了一级指标的判断矩阵(表 3)。同样地,通过计算判断矩阵并进行一致性检验,得到了二级指标 $\boldsymbol{B}$-$\boldsymbol{I}$ 的权重,并将结果列于表 4 中。根据各指标的二级权值和层次权重,计算得出主观权重 $\boldsymbol{W}_2$ = [0.082, 0.039, 0.116, 0.164, 0.100, 0.100, 0.078, 0.055, 0.156, 0.110]。

表 3　一级指标 ***A-B*** 判断矩阵

Tab. 3　Matrix for the judgment with first-class index ***A-B***

A-B	B_1	B_2	B_3
B_1	1	2	1
B_2	1/2	1	1/2
B_3	1	2	1

表 4　各级判断矩阵的权值

Tab. 4　Weights of judgment matrices at each level

判断矩阵	w_1	w_2	w_3	w_4	λ_{max}	CR	一致性
A-B	0.400	0.200	0.400	–	3.000	0.000	满足
B_1-*I*	0.205	0.096	0.289	0.409	4.121	0.045	满足
B_2-*I*	0.500	0.500	–	–	2.000	0.000	满足
B_3-*I*	0.195	0.138	0.391	0.276	4.121	0.045	满足

1.3.3　基于博弈论的耦合权重计算

为了避免单一主客观权重对预测结果产生过大影响,在对突涌水致灾指标进行赋权时,采用博弈论权重优化思想,以最小化耦合权重 $\boldsymbol{W}^*$ 与主客观权重 $\boldsymbol{W}_1$、$\boldsymbol{W}_2$ 之间的差值为目标,寻求最佳的耦合系数,并确定赋权结果的最优解[29]。

采用交叉规划模型分别对耦合系数 λ_1、λ_2 进行优化,即

$$\begin{cases} y = \min(\|\boldsymbol{W}-\boldsymbol{W}_1\|_2 - \|\boldsymbol{W}-\boldsymbol{W}_2\|_2) \\ \boldsymbol{W} = \lambda_1\boldsymbol{W}_1 + \lambda_2\boldsymbol{W}_2 \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \lambda_1\boldsymbol{W}_1\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}} + \lambda_2\boldsymbol{W}_1\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{W}_1\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}} \\ \lambda_1\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}} + \lambda_2\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{W}_2\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{2}$$

求得归一化处理后的耦合系数为

$$\lambda_1^* = \frac{|\lambda_1|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|}, \lambda_2^* = \frac{|\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|} \tag{3}$$

进而得到最优耦合权重向量为

$$\boldsymbol{W}^* = \lambda_1^*\boldsymbol{W}_1 + \lambda_2^*\boldsymbol{W}_2 \tag{4}$$

根据博弈论确定的指标综合权重如图 2 所示。计算结果显示,断层破碎带、围岩监测以及地下水对隧道施工期突涌水影响较为显著,分别占比 32.6%、23.3%(其中围岩完整程度 16.1%、围岩渗透压力 7.2%)和 18.6%;而岩层产状和支护效果对突涌水的影响相对较小,仅分别占比 3.7% 和 3.6%。因此,在隧道施工开挖过程中穿越断裂带、围岩破碎或高压富水区域时应予特别关注,并提前制定防治措施。

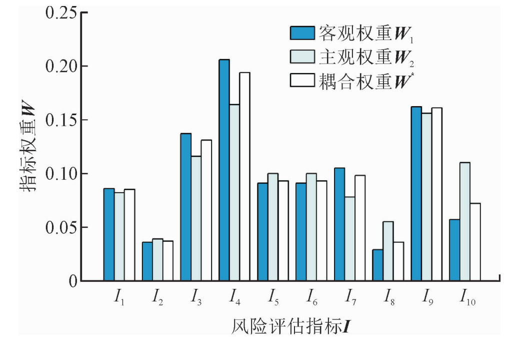


图 2　评估指标的综合权重

Fig. 2　The comprehensive weight of evaluated indicators

2　施工期突涌水风险预测的改进功效模型

突涌水是一个复杂而动态的过程,其中各项指标相互影响且存在不确定性。因此,采用改进功效系数法构建风险模型既能实现对复杂对象的全面评估,又能避免单一标准所引起的误差[30]。根据确定的指标分级标准和权重值,结合风险分析的功效系数,可以确定突涌水灾害发生的概率和风险等级,并预测施工期突涌水的水量范围。所构建的风险预测方法的流程如图 3 所示。

2.1　单指标功效系数

考虑到突涌水影响因素之间存在非独立且相互关联的关系,需要在每个风险等级下对指标分配对应的区间限值以消除指标重复性对评估结果的影响,并实现相同的度量。根据表 1 所建立的指标分级标准和测量值 x_i,可以计算出每个指标的正负功效系数,构建的正负功效系数如式(5)~(6)所示。

$$d_{ij}^{+}(x) = \left|\frac{x_{ij}^{\max} - x_i}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}}\right| \tag{5}$$

$$d_{ij}^{-}(x) = \left|\frac{x_i - x_{ij}^{\min}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}}\right| \tag{6}$$

式中：$d_{ij}^{+}(x)$ 和 $d_{ij}^{-}(x)$ 分别表示第 i 个指标在第 j 个风险等级下的正负功效系数值；$x_{ij}^{\max}$ 和 $x_{ij}^{\min}$ 是该指标在风险区间内的上限和下限值；x_i 为指标实测值。

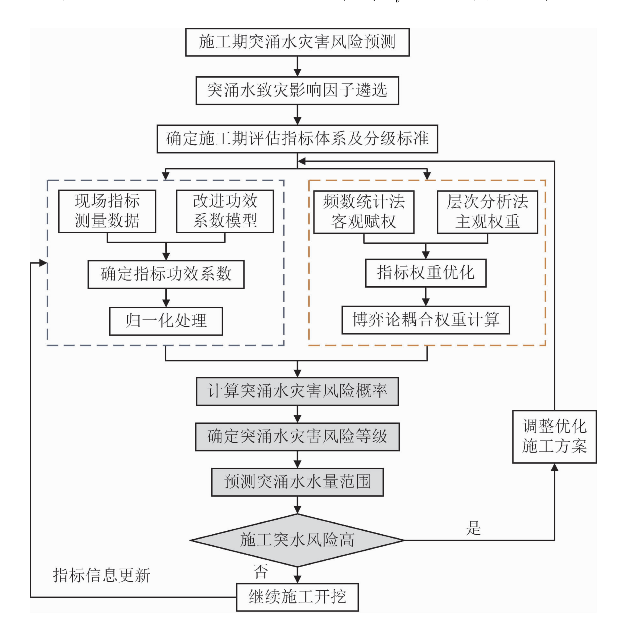


图 3　突涌水灾害风险预测流程

Fig. 3　Process for predicting the risk of water inrush disasters

2.2　多指标综合功效系数

通过对单一指标的正负功效系数和权重进行耦合，可以得到相应的多指标功效系数值，并确定综合功效系数值，如式(7)～(8)所示。

$$C_j^{+} = \sum_{i=1}^{m} \omega_i d_{ij}^{+} \tag{7}$$

$$C_j^{-} = \sum_{i=1}^{m} \omega_i d_{ij}^{-} \tag{8}$$

其中：m 为评估指标数；ω_i 为第 i 个指标的耦合权重值，满足 $\sum_{i=1}^{m} \omega_i = 1$。

2.3　风险识别分析

根据式(9)对式(7)～(8)进行处理，计算得出各个风险等级对应的隶属度 p_j。然后对综合隶属度进行归一化处理，以获得不同风险等级下的综合概率 p。

$$p_j = \frac{C_j^{+}}{C_j^{+} + C_j^{-}} \tag{9}$$

在改进功效系数法中，采用最大隶属度原则作为评估标准，即当 p 取得最大值时，该对象就处于第 j 个风险等级，对应概率即为风险发生概率。

2.4　基于致灾等级的突涌水量范围预测

根据 LI 等[7]和许增光等[9]所建立的突涌水灾害等级与突涌水量的关系，本研究针对不同致灾等级将涌水量划分为 4 个层次，见表 5。

表 5　隧道突涌水量等级划分

Tab. 5　Division of water inrush in the tunnel

致灾等级	Ⅰ(微)	Ⅱ(弱)	Ⅲ(中)	Ⅳ(强)
最大涌水量/(10^4 m^3 · d^{-1})	<0.01	0.01～0.1	0.1～1	>1

针对不同的灾害等级，本研究通过大量的文献调查和资料统计，提出以下应对措施及建议。

Ⅰ级：出现渗滴水或线状渗水，对工程施工无影响，可不采取处理措施，严格按照施工方案进行并防止致灾等级上升。

Ⅱ级：发生小型突涌水，工程损失较小。在施工中应首先进行探放水处理并进行局部注浆，在保证合理施工的同时持续关注对评估指标数据的监测。

Ⅲ级：发生中型突涌水，对施工产生影响，并导致较大规模的工程损失。应加强突涌水的调查和排水措施，采取注浆堵漏处理漏点。同时，需要加强围岩稳定性和渗透压力的监测，并实时观察支护状态和超前地质预报信息。

Ⅳ级：发生大型突涌水，造成严重危害，应立即停止施工。需采取分流降压措施疏排水，并采用超前帷幕注浆止水处理方法，加强超前地质预报，重新制定施工方案。

3　案例应用

3.1　工程案例一：鸡公岭隧道 ZK19+509～ZK19+539

3.1.1　工程概况

鸡公岭隧道是三峡翻坝高速公路全线最长的分离式隧道，具有深埋特长岩溶特征。研究区域位于隧道 ZK19+509～ZK19+539 段，地质剖面图如图 4 所示。隧址区周围发育沟槽洼地，掌子面主要由白云质灰岩和页岩组成，岩溶作用非常强烈，围岩破碎且构造破碎带夹泥富水，具有中等-强致灾性[31]。因此，进行施工时极易引发突涌水等各种地质灾害。经过对工程区地质勘探资料和相关文献[32-33]的调查分析，本研究确定了各指标的实测参数，并根据表 1 中的划分标准进行了量化处理。实测数据和取值结果汇总如表 6 所示。

表 6　鸡公岭隧道 ZK19 + 509 ~ ZK19 + 539 突涌水风险因素指标参数取值

Tab. 6　Quantitative value of risk factors for water inrush in the Jigongling Tunnel from ZK19 + 509 to ZK19 + 539

评估指标	隧道实测参数	量化取值
I_1	掌子面石牌组页岩占 33%(非可溶岩)、天河板组泥质灰岩夹页岩占 67%(弱可溶岩)	$t = 0.070$
I_2	鸡公岭一带岩层倾角约为 13°	$\varphi = 13$
I_3	构造破碎带宽约 1.2 m	$B = 1.2$
I_4	大部分为碎屑沉积物填充,主要是砂砾和黏粒等稍密充填介质,胶结较好	70
I_5	地表水流量 $Q = 98$ L/s,汇水面积 $S = 7.5$ km^2,地下径流模数 $M = 1\ 128.96$ m^3/(d · km^2)	$M = 1\ 128.96$
I_6	地下水位与隧道底板间高差为 200 m	$h = 200$
I_7	三台阶预留核心土开挖,施工扰动程度弱	70
I_8	初支完成,掌子面钻孔后出现股状流水	75
I_9	围岩十分破碎,岩石完整性系数 $K_v = 0.10$	$K_v = 0.10$
I_{10}	掌子面前方溶洞充填水压为 0.076 MPa	$p = 0.076$

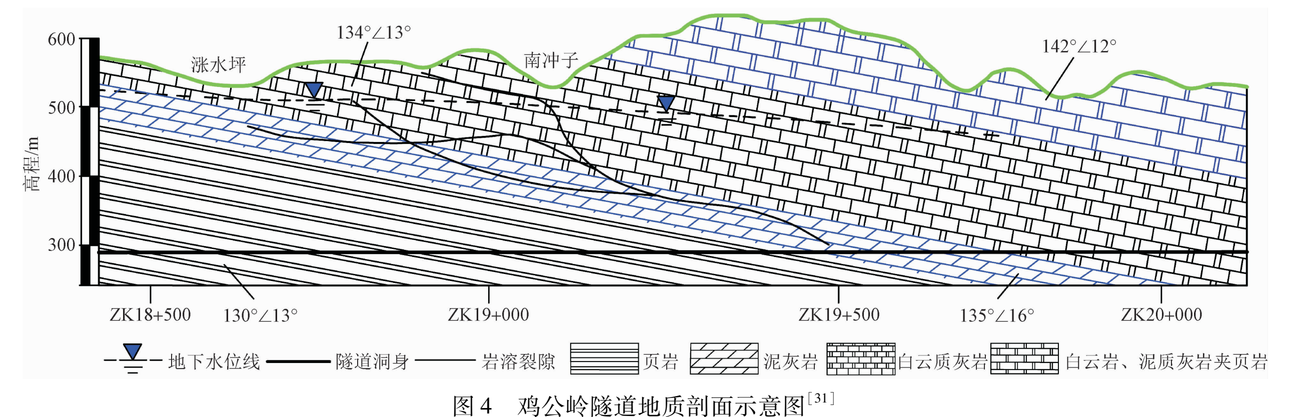


图 4　鸡公岭隧道地质剖面示意图[31]

Fig. 4　Geological cross-sectional diagram of Jigongling Tunnel[31]

3.1.2　目标段风险评估

基于构建的施工期突涌水风险评估功效系数模型,根据表 6 中给出的风险因素参数取值和式(5) ~ (6),分别计算出各评估指标的功效系数 d_{ij}^+ 和 d_{ij}^-,结合所确定的组合权重及式(7) ~ (9)计算各风险等级下的隶属度 p_j,风险等级评估结果如表 7 所示。

表 7　鸡公岭隧道 ZK19 + 509 ~ ZK19 + 539 风险评估结果

Tab. 7　Risk assessment findings for Jigongling Tunnel section ZK19 + 509 ~ ZK19 + 539

指标	取值	功效系数值								权重
		R_1		R_2		R_3		R_4		
		d_{i1}^+	d_{i1}^-	d_{i2}^+	d_{i2}^-	d_{i3}^+	d_{i3}^-	d_{i4}^+	d_{i4}^-	
I_1	0.070	0.667	1.667	0.548	0.452	1.227	0.227	1.748	0.748	0.085
I_2	13	1.600	2.600	0.600	1.600	0.800	0.200	1.600	0.600	0.037
I_3	1.2	0.400	0.600	1.267	0.267	2.267	1.267	2.700	1.700	0.131
I_4	70	0.167	1.167	0.000	1.000	1.000	0.000	2.000	1.000	0.194
I_5	1 128.96	10.290	11.290	0.143	1.143	0.968	0.032	2.290	1.290	0.093
I_6	200	5.667	6.667	3.250	4.250	0.857	1.857	0.143	0.857	0.093
I_7	70	0.167	1.167	0.000	1.000	1.000	0.000	2.000	1.000	0.098
I_8	75	0.250	1.250	0.500	1.500	0.667	0.333	1.667	0.667	0.036
I_9	0.10	3.250	2.250	2.250	1.250	1.250	0.250	0.333	0.667	0.161
I_{10}	0.076	0.240	0.760	1.080	0.080	1.540	0.540	2.848	1.848	0.072
C_j^+, C_j^-		2.253	2.792	1.008	1.188	1.229	0.460	1.691	1.065	
p_j		0.447		0.459		0.728		0.614		Ⅲ级

在归一化处理 4 个等级下的隶属度后,分别计算出各等级发生概率 $p_0 = \{0.199, 0.204, 0.324, 0.273\}$。根据最大隶属度原则 $p = \max\{0.199, 0.204, 0.324, 0.273\} = 0.324$,即可确定该段风险等级为Ⅲ级(致灾程度中等),其发生概率为 0.324,根据表 5 可预测该段涌水量为 1 000 ~ 10 000 m^3/d。

3.1.3 现场开挖验证

据现场施工资料[34]显示,当隧道开挖至 ZK19 + 509 位置时,上台阶顶部钻孔喷涌状出水,并夹携泥沙,掌子面涌水量高达 200 m^3/h (4 800 m^3/d),开挖结果如图 5 所示,风险评估结果以及预测的水量范围与实际情况相一致。



图 5 ZK19 + 509 掌子面涌水情况[4]

Fig. 5 Water inrush on tunnel palm surface (ZK19 + 509)[4]

3.2 工程案例二:跃龙门隧道 YD 2K94 + 621 ~ YD 2K94 + 701

3.2.1 工程概况

成兰铁路跃龙门隧道地处地质条件极其复杂的山区,地表岩溶峰丛发育,水资源十分丰富。掌子面前方围岩主要由较为破碎的灰岩组成,其完整性和稳定性较差。此外,节理和溶蚀裂隙较为发育,并具有较强的富水性。因此,在施工过程中存在着较高的安全风险。

本研究选取跃龙门隧道右线 YD 2K94 + 621 ~ YD 2K94 + 701 段,地质剖面图如图 6 所示,与灾害相关的各项指标的取值和实测数据详见表 8。

表 8 跃龙门隧道 YD 2K94 + 621 ~ YD 2K94 + 701 突涌水风险指标参数取值[35-36]

Tab. 8 The value of the water inrush risk index for Yuelongmen Tunnel from YD 2K94 + 621 to YD 2K94 + 701[35-36]

评估指标	隧道实际描述	量化取值
I_1	地层岩性为灰岩、夹泥质灰岩,弱-中等可溶	$t = 0.104$
I_2	岩层倾角为 10°	$\varphi = 10$
I_3	挤压断层破碎带宽度为 1.5 m	$B = 1.5$
I_4	填充挤压破碎介质	85
I_5	地表水流量 $Q = 1.04\ m^3/s$,汇水面积 $S = 12\ km^2$,地下径流模数 $M = 7\ 632\ m^3/(d\cdot km^2)$	$M = 7\ 632$
I_6	地下水位与隧道底板间高差为 50 m	$h = 50$
I_7	微三台阶预留核心土开挖,施工扰动程度弱	70
I_8	二次支护完成,掌子面钻孔有水流出	65
I_9	围岩破碎,岩石完整性系数 $K_v = 0.15$	$K_v = 0.15$
I_{10}	渗压计监测的渗透压力范围为 0 ~ 0.165 MPa	$p = 0.165$

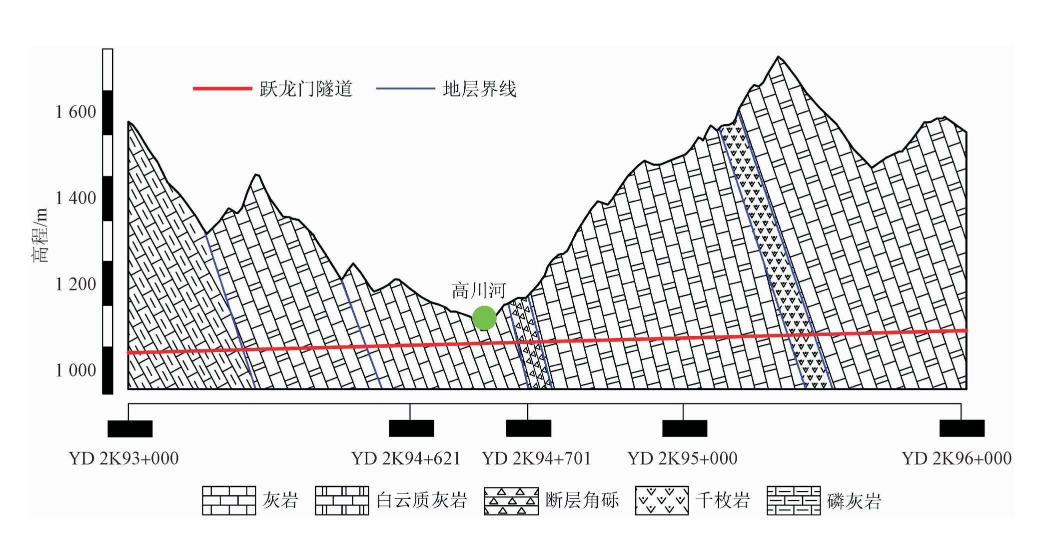


图 6 跃龙门隧道局部地质剖面示意图[35]

Fig. 6 Local geological profile diagram of Yuelongmen Tunnel[35]

3.2.2 评估段风险计算

根据确定的评估指标测量值以及分类标准,计算不同风险等级下的功效系数值,然后基于所确定的指标权重和式(9)进行综合风险识别,结果见表 9。

表 9　跃龙门隧道 YD 2K94 + 621 ~ YD 2K94 + 701 风险计算结果

Tab.9　The risk calculation results of Yuelongmen Tunnel from YD 2K94 + 621 to YD 2K94 + 701

评估指标	取值	功效系数值								权重
		R_1		R_2		R_3		R_4		
		d_{i1}^+	d_{i1}^-	d_{i2}^+	d_{i2}^-	d_{i3}^+	d_{i3}^-	d_{i4}^+	d_{i4}^-	
I_1	0.104	1.476	2.476	0.000	1.000	1.000	0.000	1.610	0.610	0.085
I_2	10	1.000	2.000	0.000	1.000	1.000	0.000	1.750	0.750	0.037
I_3	1.5	0.250	0.750	1.167	0.167	2.167	1.167	2.625	1.625	0.131
I_4	85	0.417	1.417	1.500	2.500	0.000	1.000	1.000	0.000	0.194
I_5	7 632	75.320	76.320	7.369	8.369	0.658	1.658	0.123	0.877	0.093
I_6	50	0.667	1.667	0.500	0.500	1.286	0.286	2.286	1.286	0.093
I_7	70	0.167	1.167	0.000	1.000	1.000	0.000	2.000	1.000	0.098
I_8	65	0.083	1.083	0.500	0.500	1.333	0.333	2.333	1.333	0.036
I_9	0.15	3.000	2.000	2.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.161
I_{10}	0.165	0.650	1.650	0.783	0.217	1.392	0.392	2.670	1.670	0.072
C_j^+, C_j^-		7.909	8.522	1.574	1.748	0.994	0.569	1.436	0.921	
p_j		0.481		0.474		0.636		0.609		Ⅲ级

根据计算结果,对综合隶属度进行归一化处理,以确定不同风险等级下的综合概率: p(Ⅰ) = 0.219, p(Ⅱ) = 0.215, p(Ⅲ) = 0.289, p(Ⅳ) = 0.277。因此,可预测在该断面发生突涌水的风险概率 $p = 0.289$,并且灾害等级被评定为Ⅲ级(中等),涌水量范围在 1 000 ~ 10 000 m^3/d 之间。

3.2.3　评价结果分析

隧道施工至 YD 2K94 + 671 位置时,现场三维成像探测显示隧道前方存在含导水构造和破碎富水区[35]。经开挖验证发现,地表降雨作用导致掌子面大量渗水,涌水量约为 7 000 m^3/d,与预测的范围相一致。

4　结果讨论

本研究提出了一种基于博弈论组合权重和改进功效系数的隧道施工期突涌水灾害风险预测方法。该方法充分考虑了现场施工和监测数据对突涌水的影响,并通过反馈施工现场监测数据来确定风险发生概率。此外,该方法不仅适用于多种类型地质情况下的风险预测,还能推断隧洞内部可能产生的涌水量,并在施工过程中不断更新。

通过对比风险预测结果与实际风险等级,发现所得到的预测结果与工程实际开挖基本一致。这表明本研究提出的考虑现场监测的施工期突涌水风险预测方法是可行且有效的。此外,研究发现所选鸡公岭和跃龙门隧道呈现较高风险等级,因此,在施工过程中需要特别注意对围岩和水压进行监测,并制定有效的预防措施以降低灾害发生概率,尤其是在穿越断裂带和围岩破碎区域时。

为了验证预测方法的准确性和合理性,本研究将逐一与属性数学理论、改进属性数学理论、模糊数学法以及功效系数法进行比较,并将对比结果详细展示于表 10 中。可以观察到,将改进功效系数法应用于施工期突涌水风险评估得出的结果与其他方法预测结果一致。同时,相较于属性数学理论和改进属性数学理论,在本方法中采用最大隶属度原则确定等级,更加直观地呈现了风险概率,避免了复杂的属性识别累计求和步骤,操作简便。与模糊数学法相比,改进功效系数法综合考虑了评估指标和风险等级之间的非线性关系,消除了随机性在隶属度函数和权重确定上带来的影响,使隶属度分布更加合理。此外,在每个风险等级下根据各指标的区间限制确定功效系数,相较于传统功效系数法,消除了指标重复性对评估结果的影响并实现了相同度量,在准确预测风险概率的同时减少主观成分引入。

综合考虑评估指标和风险等级之间非线性关系建立的多元信息突水评估模型使预测结果更接近实际施工情况,既能全面评估复杂对象,又可避免由于单一标准所引起误差。因此,该模型可作为一种便捷高效的评估方法广泛应用于施工期突涌水风险预测。

表10 使用不同方法的结果对比

Tab. 10 Comparison of results using different methods

评估对象	评估方法	R_1	R_2	R_3	R_4	风险等级	现场实测等级
鸡公岭隧道	本研究方法	0.199	0.204	0.324	0.273	Ⅲ	Ⅲ
	属性数学理论	0.172	0.296	0.306	0.227	Ⅲ	
	改进属性数学理论	0.189	0.272	0.297	0.243	Ⅲ	
	模糊数学法	0.070	0.278	0.484	0.169	Ⅲ	
	功效系数法	81.448				Ⅲ	
跃龙门隧道	本研究方法	0.219	0.215	0.289	0.277	Ⅲ	Ⅲ
	属性数学理论	0.099	0.344	0.287	0.271	Ⅲ	
	改进属性数学理论	0.112	0.330	0.287	0.271	Ⅲ	
	模糊数学法	0.033	0.220	0.460	0.288	Ⅲ	
	功效系数法	83.186				Ⅲ	

5 结 论

1)在本研究中,综合考虑地质构造、水文地质和施工监测等多元信息,并选取了地层岩性、岩层产状、断层破碎带宽度和充填物、地下水富水性、地下水位、施工工法、支护效果以及围岩完整程度和渗透压力等10个影响因子作为评估指标,从而构建了一套用于施工期突涌水评估的指标体系。

2)提出了一种基于博弈论组合权重和改进功效系数的突涌水灾害风险预测方法,通过优化评估指标权重,并结合反馈施工现场监测数据确定风险发生概率并预测水量范围,为准确预测隧道施工中的突涌水风险提供新的研究思路。

3)经过对鸡公岭隧道和跃龙门隧道的案例研究,采用该方法对施工中突涌水风险进行了预测。通过与实际开挖情况以及属性识别方法、模糊数学法和功效系数法进行比较分析,验证了该方法的准确性和合理性,并为类似工程施工期突涌水灾害评估提供指导。

4)隧道突涌水是多种因素综合作用的结果,具有一定程度的不确定性。本研究从围岩稳定性和孔隙水压力角度出发,选择易于获取的监测信息进行预测。在实际应用中,还需要结合现场情况和灾害后果进行评估,以更精确地预测和防范施工期突涌水灾害的发生。

参考文献:

[1] XUE Y G, KONG F M, LI S C, et al. Water and mud inrush hazard in underground engineering: genesis, evolution and prevention[J]. Tunnelling and underground space technology, 2021, 114: 103987.

[2] WANG X L, LAI J X, QIU J L, et al. Geohazards, reflection and challenges in mountain tunnel construction of China: a data collection from 2002 to 2018[J]. Geomatics, natural hazards and risk, 2020, 11(1): 766-785.

[3] WANG S, LI S C, LI L P, et al. Study on early warning method for water inrush in tunnel based on fine risk evaluation and hierarchical advance forecast[J]. Geosciences, 2019, 9(9): 392.

[4] LI L P, LEI T, LI S C, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels and software development[J]. Arabian journal of geosciences, 2015, 8(4): 1843-1854.

[5] HUANG X, LI S C, XU Z H, et al. Assessment of a concealed karst cave's influence on karst tunnel stability: a case study of the Huaguoshan Tunnel, China[J]. Sustainability, 2018, 10(7): 2132.

[6] LIN P, XIONG Y, XU Z H, et al. Risk assessment of TBM jamming based on Bayesian networks[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2021, 81(1): 47.

[7] LI S C, ZHOU Z Q, LI L P, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on attribute synthetic evaluation system[J]. Tunnelling and underground space technology, 2013, 38: 50-58.

[8] ZHANG K, TANNANT D D, ZHENG W B, et al. Prediction of karst for tunnelling using fuzzy assessment combined with geological investigations[J]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 80: 64-77.

[9] 许增光,王亚萍,肖瑜,等.长深隧洞突涌水危险性等级指标及评价方法[J].中国公路学报,2018,31(10):91-100.
XU Zengguang, WANG Yaping, XIAO Yu, et al. Risk rating index and evaluation method for water inrush in long-deep tunnels[J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(10): 91-100(in Chinese).

[10] 李利平,李术才,陈军,等.基于岩溶突涌水风险评价的隧道施

工许可机制及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1345-1355.

LI Liping,LI Shucai,CHEN Jun,et al. Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2011,30(7):1345-1355(in Chinese).

[11] 袁青,陈培帅,钟涵,等. 基于优化 FAHP-TOPSIS 法的高压富水花岗岩断层涌水预测[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(5):766-774.

YUAN Qing,CHEN Peishuai,ZHONG Han,et al. Water gushing prediction in high-pressure water-rich granite fault zone based on optimized FAHP-TOPSIS method[J]. Tunnel construction,2019,39(5):766-774(in Chinese).

[12] WANG X T,LI S C,XU Z H,et al. An interval risk assessment method and management of water inflow and inrush in course of karst tunnel excavation[J]. Tunnelling and underground space technology,2019,92:103033.

[13] SOUSA R L,EINSTEIN H H. Lessons from accidents during tunnel construction[J]. Tunnelling and underground space technology,2021,113:103916.

[14] WANG Y C,JING H W,YU L Y,et al. Set pair analysis for risk assessment of water inrush in karst tunnels[J]. Bulletin of engineering geology and the environment,2017,76(3):1199-1207.

[15] 李术才,许振浩,黄鑫,等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(5):1041-1069.

LI Shucai,XU Zhenhao,HUANG Xin,et al. Classification,geological identification,hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2018,37(5):1041-1069(in Chinese).

[16] 许振浩,李术才,李利平,等. 基于风险动态评估与控制的岩溶隧道施工许可机制[J]. 岩土工程学报,2011,33(11):1714-1725.

XU Zhenhao,LI Shucai,LI Liping,et al. Construction permit mechanism of karst tunnels based on dynamic assessment and management of risk[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2011,33(11):1714-1725(in Chinese).

[17] 许增光,线美婷,熊伟,等. 基于集对分析模型的岩溶区浅埋穿河隧道突涌水危险性评价[J]. 应用力学学报,2023,40(1):135-145.

XU Zengguang,XIAN Meiting,XIONG Wei,et al. Risk assessment of water inrush in karst shallow tunnel under river based on SPA model[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(1):135-145(in Chinese).

[18] 许振浩,李术才,李利平,等. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J]. 岩土力学,2011,32(6):1757-1766.

XU Zhenhao,LI Shucai,LI Liping,et al. Risk assessment of water or mud inrush of karst tunnels based on analytic hierarchy process [J]. Rock andsoil mechanics,2011,32(6):1757-1766(in Chinese).

[19] 凡净,李晓昭,黄震,等. 导水夹泥断裂破碎岩内在结构与渗透性[J]. 中国公路学报,2018,31(10):160-166.

FAN Jing,LI Xiaozhao,HUANG Zhen,et al. Internal structural characteristics and permeability of kata-rocks in geological structures filled with water and mud[J]. China journal of highway and transport,2018,31(10):160-166(in Chinese).

[20] WANG M X,YANG W M,ZHOU Z Q,et al. Experimental study on fractal characteristics of fault filling medium in the tunnel and relationship between fractal dimension and permeability coefficient [J]. Geomechanics and geophysics for geo-energy and geo-resources,2021,8(1):6.

[21] SHI S S,XIE X K,BU L,et al. Hazard-based evaluation model of water inrush disaster sources in karst tunnels and its engineering application[J]. Environmental earth sciences,2018,77(4):141.

[22] 陶明,向恭梁,赵瑞. 深埋引水隧洞对应力波的散射与动应力集中[J]. 应用力学学报,2022,39(5):859-868.

TAO Ming,XIANG Gongliang,ZHAO Rui. Scattering of stress wave and dynamic stress concentration for deep diversion tunnel[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(5):859-868(in Chinese).

[23] ZHANG J Q,LI S C,ZHANG Q S,et al. Mud inrush flow mechanisms:a case study in a water-rich fault tunnel[J]. Bulletin of engineering geology and the environment,2019,78(8):6267-6283.

[24] TIAN G B,DAI J,WU Y,et al. Stability analysis of surrounding rock of water-rich tunnel and optimization of blasting construction method[J]. Journal of coastal research,2020,115(S1):514-517.

[25] WANG S,LI L P,CHENG S,et al. Dynamic risk assessment method of tunnel collapse based on attribute interval assessment model and application[J]. Polish journal of environmental studies,2020,29(5):3853-3864.

[26] 武崇福,胥刘奇,王立伟. 考虑刀盘影响的饱和土盾构对地层干扰分析[J]. 应用力学学报,2023,40(2):386-396.

WU Chongfu,XU Liuqi,WANG Liwei. Analysis of ground disturbance caused by shield construction considering cutter head in saturated soil[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(2):386-396(in Chinese).

[27] YANG X L,ZHANG S. Risk assessment model of tunnel water inrush based on improved attribute mathematical theory[J]. Journal of Central South University,2018,25(2):379-391.

[28] SHAPIRO A F,KOISSI M C. Fuzzy logic modifications of the analytic hierarchy process[J]. Insurance:mathematics and economics,2017,75:189-202.

[29] 刘巧梅,温海燕,李爱春,等. 基于博弈论组合赋权-未确知测度理论的隧道突涌水风险评价[J]. 武汉大学学报(工学版),2023,56(7):799-806.

LIU Qiaomei, WEN Haiyan, LI Aichun, et al. Risk assessment of tunnel water inrush based on game theory combinatorial weighting-unascertained measure theory[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2023,56(7):799-806(in Chinese).

[30] 吴博,赵法锁,吴韶艳. 基于组合赋权-功效系数法的黄土边坡稳定性评价[J]. 灾害学,2020,35(2):34-38.
WU Bo, ZHAO Fasuo, WU Shaoyan. Stability evaluation of loess slope based on combined weighting and efficiency coefficient method[J]. Journal of catastrophology, 2020, 35(2): 34-38 (in Chinese).

[31] 周宗青,李术才,李利平,等. 岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用[J]. 岩土力学,2013,34(3):818-826.
ZHOU Zongqing, LI Shucai, LI Liping, et al. Attribute recognition model of fatalness assessment of water inrush in karst tunnels and its application[J]. Rock andsoil mechanics,2013,34(3):818-826 (in Chinese).

[32] 石少帅. 深长隧道充填型致灾构造渗透失稳突涌水机理与风险控制及工程应用[D]. 济南:山东大学,2014.

[33] 李志强,柳长江,江浩浩,等. 隧道上覆溶洞防突安全厚度预测系统及工程应用[J]. 公路交通科技,2017,34(7):85-93.
LI Zhiqiang, LIU Changjiang, JIANG Haohao, et al. Prediction system of safety thickness against water-filling of karst cave overlying in tunnel and engineering application[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2017, 34(7): 85-93 (in Chinese).

[34] 李术才,石少帅,李利平,等. 三峡库区典型岩溶隧道突涌水灾害防治与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(9):1887-1896.
LI Shucai, SHI Shaoshuai, LI Liping, et al. Control of water inrush in typical karst tunnels in Three Gorges reservoir area and its application[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014,33(9):1887-1896(in Chinese).

[35] 鲜国,石少帅,赵勇,等. 强富水隧道下穿河段突涌水灾害综合防控方法研究与应用[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2019,1(2):74-82.
XIAN Guo, SHI Shaoshuai, ZHAO Yong, et al. Research and application of comprehensive prevention and control method for water inrush in water enriched under-crossing river tunnel[J]. Hazard control in tunnelling and underground engineering,2019,1(2):74-82 (in Chinese).

[36] 王升. 隧道突涌水灾害区域性动态风险评估与预测预警及工程应用[D]. 济南:山东大学,2016.

(编辑 李坤璐)